

Marko Ruuhonen

KOMPOSIITTIRAKENTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖMOOTTORIN TUOTEKEHITYKSESSÄ

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2011

KOMPOSIITTIRAKENTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖMOOTTORIN TUOTEKEHITYKSESSÄ

Ruohonen, Marko
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Marraskuu 2011
Ohjaaja: Pulkkinen, Petteri
Sivumäärä: 33

Asiasanat: sähkömoottori, komposiitti, pultruusio

Tämän opinnäytetyön aiheena oli komposiittirakenteiden hyödyntäminen sähkömoottorin tuotekehityksessä. Työssä perehdytään erilaisiin komposiittimateriaaleihin ja etenkin pultruusiotekniikkaan.

Uusien komposiittimateriaalien ja niiden kehityksen myötä ne ovat mahdollistaneet aivan uudenlaisten sovellusten, suunnittelun sekä rakennerratkaisujen käytön sähkömoottorien tuotekehityksessä. Uusien innovaatioiden myötä sähkömoottorien ja etenkin kestopagneettimoottorien tehokkuus sekä käyttö on lisääntynyt merkittävästi.

Pehmeäagneettisten komposiittimateriaalien käyttö sähkömoottorien tuotekehityksessä on mahdollistanut uudet ominaisuudet ja sovellukset sähkömoottoreissa. Ne ovat parantaneet moottorien suunnittelua, materiaalien kierrätettävyyttä, ympäristöystävällisyyttä sekä yksinkertaistaneet moottorien rakennetta.

Komposiittimateriaalien valmistustekniikat ovat myös luoneet uusia mahdollisuuksia sähkömoottorien tuotekehityksessä. Etenkin pultruusiotekniikka mahdollistaa komposiittiprofiilien massatuotannon erittäin tehokkaasti ja laskee valmistuskustannuksia. Komposiittien valmistustekniikoiden myötä myös valmistusmateriaalien menekki on pienentynyt ja valmistustehokkuus parantunut.

UTILIZING COMPOSITE STRUCTURES IN THE DESIGN OF ELECTRIC MOTORS

Ruohonen, Marko

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

November 2011

Supervisor: Pulkkinen, Petteri

Number of pages: 33

Keywords: electric motor, composite, pultrusion

The purpose of this thesis was to study the use of composite structures in electric motor product development. The work was devoted to various composite materials and particularly to the study of pultrusion process.

The development of new composite materials makes it possible to develop entirely new kinds of applications and constructions for the electric motors. The new innovations in the design of electric motors and especially permanent magnet motors have increased the effectiveness significantly. The use of soft magnetic composite materials in the development of electric motors has enabled new features and applications. Their use has improved engine design, materials recyclability, eco-environmental friendliness as well as simplified the motor structure.

Manufacturing techniques of the composite materials have also created new opportunities in the development of electric motors. Especially pultrusion process of composite profiles enables efficient mass production and also reduces the costs. By utilizing composite manufacturing techniques the disposal of construction materials has been reduced and manufacturing efficiency has been improved.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	SÄHKÖMOOTTORIN RAKENNE	5
2.1	Rakenne yleisesti	5
2.2	Eristerakenteet	6
2.2.1	Johdineristys.....	7
2.2.2	Pääeristys.....	8
2.2.3	Eristemateriaalit	8
3	KÄYTTÖSSÄ OLEVAT KOMPOSIITIT	10
3.1	Pehmeämagneettiset komposiitit (SMC)	11
3.2	Materiaalien valitseminen.....	13
3.2.1	Puhdas rauta	14
3.2.2	Rauta-nikkeli seokset	15
3.2.3	Rauta-pii seokset	16
3.2.4	Rauta-koboltti seokset	16
3.3	Eristetyt rautapohjaiset jauheet.....	17
3.3.1	Orgaaniset päällysteet	18
3.3.2	Epäorgaaniset päällysteet	20
3.4	Pultruusio	21
3.5	Sovellukset.....	23
4	PULTRUUSIOTEKNIKALLA VALMISTETTUIEN TUOTTEIDEN SOVELTUVUUS MARKKINOILLA KÄYTETTÄVIIN MENETELMIIN	28
5	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET.....	31

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia missä määrin komposiittirakenteita käytetään sähkömoottorien ja etenkin kestromagneettimoottorien tuotekehityksessä. Työssä on tarkoitus kartoittaa minkälaisia komposiittimateriaaleja ja menetelmiä uusien sähkömoottorien tuotekehittelyssä pääsääntöisesti käytetään sekä millaisia sovelluksia uudenlaiset komposiittiratkaisut mahdollistavat. Työssä on tarkoitus perehtyä hieman enemmän pultruusiotekniikkaan ja tutkia minkälaisia mahdollisuuksia pultruusio tarjoaa sähkömoottorien tuotekehityksessä.

SÄHKÖMOOTTORIN RAKENNE

1.1 Rakenne yleisesti

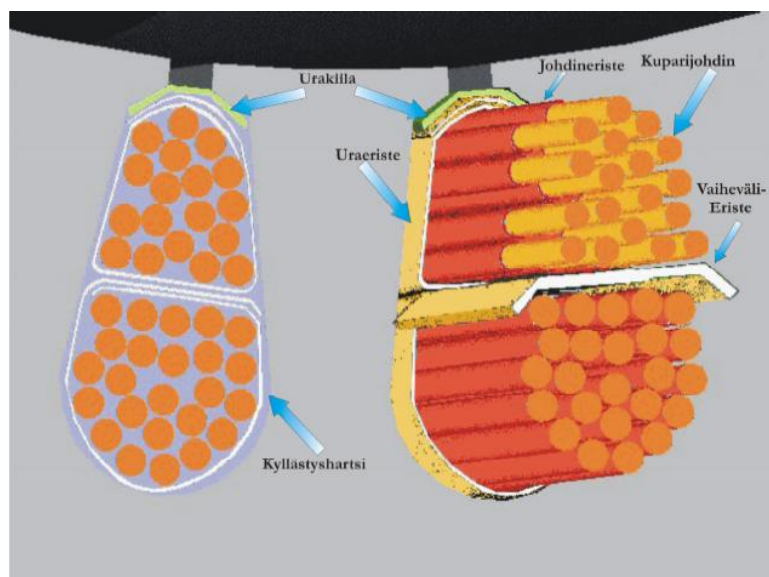
Sähkömoottoreita on useaa eri tyyppiä. Yleisimmät moottorityypit ovat epätahti- ja tahtikoneet, joiden toiminta perustuu koneen sisällä pyörivään magneettikenttään. Vaikka koneita on useita eri tyyppisiä eri ominaisuuksilla ja erilaisia erikoiskoneita, on kaikkien tavanomaisten koneiden perusrakenne sama. Moottorit koostuvat staattorista, joka toimii samalla koneen runkona. Staattorin sisällä on roottori, joka pyörii vapaasti staattorin ja roottorin välisen ilmarakon ansiosta. Roottori ja siitä lähtevä akseli on tuettu staattoriin kiinnitettyjen laakerien varaan. Staattoriin ja roottoriin on asennettu käämitykset, joiden rakenne vaihtelee konetyypin ja tarkoituksen mukaan. Staattori- ja roottorikäämitykset saavat magneettivuon kulkemaan staattorilta roottorille ja takaisin staattoriin muodostaen magneettikentän staattorin ja roottorin väliseen ilmarakoon, joka saa moottorin pyörimään.

Nykyään yleistymässä ovat myös ns. kestromagneettimoottorit. Niiden rakenne eroaa tavanomaisista moottoreista siten, että niiden roottorikäämitykset on korvattu kestromagneeteilla. Kestromagneettimoottorien rakenne on yksinkertaisempi kuin tavanomaisten sähköisesti magnetoitujen koneiden. Ne ovat myös kevyempiä rakenteeltaan, koska niiden roottorissa ei tarvita rautaa. Tämän lisäksi ne tarjoavat myös muita etuja tavanomaisiin koneisiin nähden. Kestromagneettimoottorien eduista ja sovelluksista on kerrottu hieman tarkemmin kappaleessa 4.4. [1]

1.2 Eristerakenteet

Sähkökoneita suunniteltaessa on otettava huomioon eristysten aiheuttamat vaatimukset. Sähkökoneiden eristys vaikuttaa koneen käyttöikään ja huoltoväleihin. Sähkökoneiden eristyksen on kestävä koneen jatkuvaa käyttöä tai vastaavasti koneen epäsäännöllistä käyttöä riippuen kohteesta. Sähkökoneiden eristyksen pääasiallinen tehtävä on erottaa kaksi eri potentiaalissa olevaa osaa toisistaan. Sähkökoneen käyttö asettaa myös omat vaatimuksensa koneen eristykselle. Eristyksen tulee kestää korkeita lämpötiloja sekä lämpötilojen vaihteluita ja toimia myös lämmönjohtimena. Lisäksi sen tulisi kestää mekaanisia rasituksia kuten tärinää, ympäristön aiheuttamia rasituksia, kuten kosteutta sekä jännitteen aiheuttamia rasituksia, kuten erilaisista tekijöistä johtuvia ylijännitteitä.

Sähkökoneiden eristykset jaetaan yleensä kahteen osaan: johdin- ja pääeristykseen. Johdineristyksestä puhuttaessa tarkoitetaan eristystä, jonka tarkoituksena on eristää käämien johdinlangat ja kierrokset toisistaan. Pääeristyksestä puhuttaessa tarkoitetaan eristystä, joka erottaa kaksi eri potentiaalissa olevaa osaa toisistaan. Pääeritykseen kuuluu uraeristys, vaiheväliseristykset ja kaikki liitäntöjen eristykset. Kuvassa 1 on havainnollistettu staattorin pyörölänkakäämityksen eristerakenteet. [2]

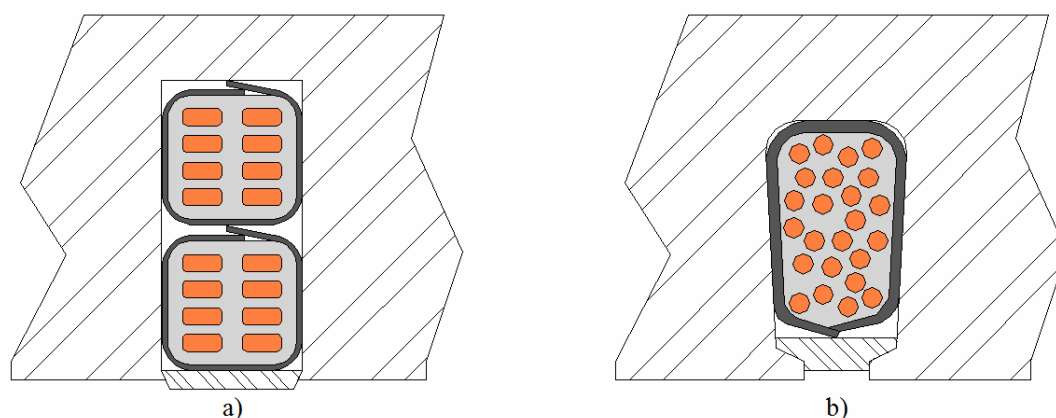


Kuva 1. Staattorin pyörölänkakäämityksen eristerakenne. [3]

1.2.1 Johdineristys

Johdineristyksellä tarkoitetaan staattorin käämityksen eristystä. Johdineristyksen pääsääntöinen tarkoitus on eristää käämivyyhtien erilliset kuparijohtimet toisistaan (kuva 1). Johdineristyksen jännitekestoisuuden ei yleensä tarvitse olla niin korkea kuin pääeristyksellä, sillä johtimien potentiaaliero on pieni. Tämä mahdollistaa ohuen eristyksen. Mekaanista kestävyyttä johdineristykseltä vaaditaankin enemmän ja sen tulisi kestää johtimiin aiheutuvat raskut, kuten käämimisestä aiheutuvat raskut. Käämimisessä johtimet voivat joutua kosketuksiin esimerkiksi terävien kulmien kanssa. Lisäksi eristyksen tulisi olla taipuisa, sillä käämimisessä johtimet myös taipuvat. Johdineristyksen tulisi kestää hyvin myös lämpöä, koska se on suoraan kiinni kuumassa kuparissa. Eristyksen tulisi kestää erilaisia kemikaaleja riippuen siitä, mitä kyllästysainetta käytetään.

Staattorin johdineristys riippuu myös staattorikäämityksen rakenteesta. Käämitys voidaan tehdä joko pyörölanka- tai muotokuparikäämityksenä, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Muotokuparikäämitys tehdään valmiiksi paketiksi ja asennetaan koneeseen eikä siihen ole välttämätöntä tehdä erillisiä eristystoimenpiteitä. Pyörölankakäämitys taas tehdään erillisistä johtimista, jotka laitetaan staattorin uraan yksitellen. Johtimet voivat olla epämääräisessä järjestyksessä urassa. Pyörölankakäämistä käytettäessä on uraeristys ja kyllästyseristys tehtävä erikseen. [2]



Kuva 2. Kuvassa a) muotokuparikäämitys ja b) pyörölankakäämitys. [4]

1.2.2 Pääeristys

Pääeristyksellä tarkoitetaan eristystä, jolla eristetään kaksi eri potentiaalissa olevaa osaa toisistaan. Uraeristys on osa pääeristystä ja sillä tarkoitetaan eristystä, joka erottaa kupariset käämi johtimet maapotentiaalissa olevasta staattorinrungosta. Uraeristys onkin sähkökoneen käytön kannalta merkittävin eristys ja sen pettäessä koneen runko voi vaurioitua ja kone pitää käämiä uudestaan. Toisin kuin johdineristykseltä, uraeristykseltä vaaditaan hyvää jännitekestoisuutta. Uraeristyksen tulisi kestää ainakin sähkökoneen oma jännite. Lisäksi suurjännitekoneilla uraeristykselle ongelmia aiheuttavat osittaispurkaukset, joita voi syntyä myös pienemmillä jännitteillä etenkin taajuusmuuntajakäytössä.

Mikäli sähkökoneen rakenne on sellainen että staattorin urassa on useampi kuin yksi vyyhde voidaan myös uraeristettä käyttää hyväksi vaiheväliseristyksessä. Tällöin esimerkiksi kahden eri vyyhteen ympärille kiedottu uraeriste muodostaa vaiheväliseristuksen vyyhtien väliin.

Lopuksi kun staattorin uraan on asennettu uraeristys sekä johtimet tehdään ns. kyllästyseristys. Ura täytetään tietyllä kyllästysaineella, jolloin käämityksestä tulee mekaanisesti vahvempi yhtenäinen kokonaisuus. Kyllästysaineen täyttäessä uran se toimii myös eristeenä ja paikkaa mahdolliset johdineristyksen puutteet. Kuvassa 1 oli havainnollistettu sähkömoottorin staattorin ura- ja vaiheväliseristuksen rakennetta sekä kyllästysartsilla täytettyä staattorin uraa, jossa käämitys oli toteutettu pyörölangoil- la. [2]

1.2.3 Eristemateriaalit

Tärkeimpiä eristysmateriaaleja ovat emalit eli lakat, erilaiset kuitueristeet, kiille-eristeet sekä erilaiset hartsit. Emali on lakkaa, jota käytetään sähkökoneiden johdinten pinnalla johdineristeenä. Emalilangat valmistetaan kuparijohtimista, jotka päällystetään usealla lakkakerroksella.

Kuitueristeisiin kuuluvat polyesterikuidut, joista yleisin on PEPT eli polyetyleenitereftalaatti, lasikuitu ja aramid -kuidut. Polyesterikuidut ja niistä valmistetut polyeste-

rikalvot syrjäyttivät aikanaan sähkömoottoreissa eristeinä käytetyt selluloosakuidut. Polyesterikuiduille, kuten muillekin kuiduille, ominaista on hyvä lämmönkestävyys. Polyesterikuitu pehmenee vasta yli 200 °C lämpötilassa ja sen sulamispiste on 260 °C. Polyesterikuitujen mekaaninen kestävyys sekä kosteuden ja kemiallisten aineiden kestävyys on parempi kuin aikaisemmin käytettyjen selluloosakuitujen. Polyesterikuitu kutistuu korkeissa lämpötiloissa, mutta sitä voidaan myös käyttää hyödyksi esimerkiksi sidosten tiukkaamisessa. Polyesterikuidun lämmönjohtavuus on kuitenkin huono. Toinen kuitueriste on lasikuitu, joka on vahvempaa kuin polyesterikuitu. Pelkän lasikuidun murtolujuus on heikko ja esimerkiksi sähkökoneiden tärinän takia sitä ei voida käyttää sinällään, vaan lasikuitu täytyy kyllästää esimerkiksi hartsilla. Lasikuitu on palamatonta ja sen lämmönjohtavuus on parempi kuin polyesterikuitujen, mikä kuitenkin laskee merkittävästi kyllästymisaineen vaikutuksesta. Lasikuitua käytetään etenkin suurjännitekoneissa, joissa sen osittaispurkauskestävyys on välttämättömyys. Kolmas käytetty kuitumateriaali sähkökoneiden eristyksissä on aramid -kuitu. Aramid -kuitu ja -paperi ovat palamattomia ja soveltuvat käytettäväksi korkeisiin lämpötiloihin. Aramid -kuidun lämmönjohtavuus on heikompi kuin polyesterikuitujen mutta sillä voidaan saada yhtä hyvä eristys ohuemmalla materiaalikerroksella. Aramid -kuidun läpilyöntilujuus on myös parempi kuin polyesterikuiduilla.

Kiille on eristeenä täysin luonnontuote. Kiilteen kiteet ovat ohuita ja muodoltaan suomumaisia ja ne muodostavat kerroksia, ns. kiillesuomuja. Kiilteen rakenteen takia se ei pysy koossa itseksensä vaan tarvitsee jonkin sideaineen, kuten lasikuidun saavuttaakseen tarpeeksi vahvan mekaanisen kestävyuden. Kiilteen lämmönkestävyys on erittäin hyvä ja se soveltuu myös erinomaisesti suurjännitekoneisiin ominaisuuksiensa ansiosta. Kiilteen ominaisuuksiin kuuluu mm. suuri läpilyöntilujuus sekä erittäin hyvä osittaispurkauksien kestoisuus. Kiilteen heikkoutena on sen kemiallinen kestävyys, eikä kiilteen rakenne kestä esimerkiksi öljyä.

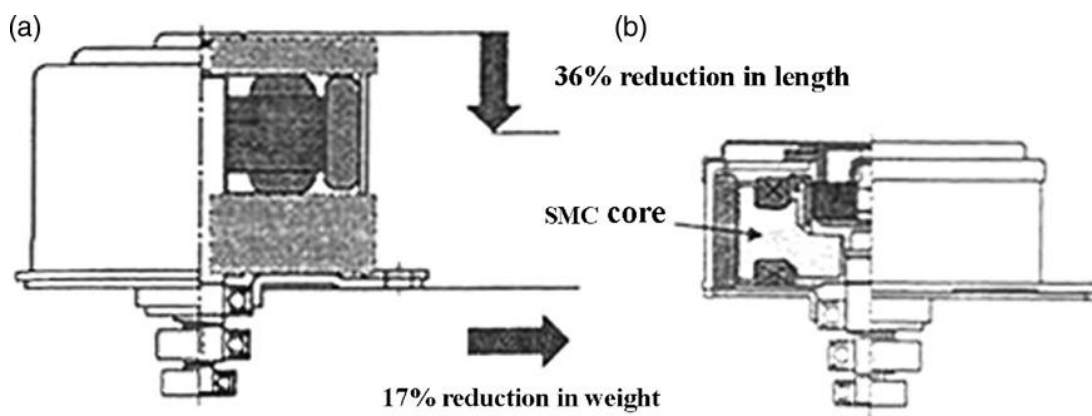
Sähkökoneiden eristyksissä kyllästyshartseina käytetään polyesteri- ja epoksipohjaisia kyllästysaineita. Kyllästys on tärkeää sähkökoneissa ja sen tarkoituksena on parantaa sähkökoneen rakennetta. Kovettunut hartsi tekee käämityksen rakenteesta mekaanisesti kestävämmän, parantaa kosteuden kestoisuutta, korjaa mahdolliset viat johdineristyksissä ja parantaa käämityksen lämmönjohtavuuskykyä. [2]

2 KÄYTÖSSÄ OLEVAT KOMPOSIITIT

Sähkökoneiden tehokkuus on parantunut merkittävästi viime vuosina etenkin uusien materiaalien ja suunnittelun ansiosta. Merkittävimpiä edistysaskeleita on ollut erilaisien komposiittien hyödyntäminen sähkökoneiden suunnittelussa. Komposiittirakenteiden ansiosta sähkökoneen suunnittelu voidaan toteuttaa 3D-mallin mukaisesti mikä parantaa mm. koneen tehokkuutta ja tekee sen rakenteesta yksinkertaisemman, kuten kuvassa 3 on havainnollistettu. Komposiittirakenteilla saadaan myös pienennettyä sähkökoneen kokoa ja vähennettyä painoa, jota on havainnollistettu kuvassa 4. Näin ollen säästetään valmistusmateriaaleissa, jolloin myös materiaalien kierrätettävyys paranee sähkökoneen rakenteen yksinkertaistuessa. [5]



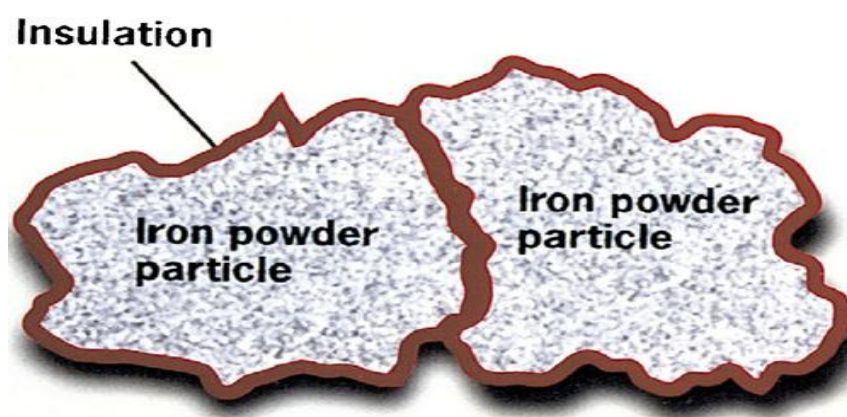
Kuva 3. Havainnollistaa tavanomaisen moottorin (vasemmalla) ja SMC moottorin (oikealla) rakenteellisia eroja ja osien määrää. [6]



Kuva 4. Havainnollistaa sähkömoottorin koon pienenemistä: (a) tavanomainen moottori ja (b) paranneltu SMC moottori. [7]

2.1 Pehmeämagneettiset komposiitit (SMC)

Viimeisten vuosien aikana kiinnostus tutkia pehmeämagneettisia komposiitteja eli SMC -materiaaleja on kasvanut kiihtyvällä vauhdilla. Uudet kehitykset hiukkaskomposiiteissa tekevät SMC -materiaaleista mielenkiintoisia sovelluksia sähkökoneisiin, kun yhdistetään sähkökoneen uudentyylinen suunnittelu ja uudet tuotantotekniikat. SMC -materiaalit valmistetaan jauhemetallurgia -tekniikalla, jossa puhtaat rautajauheen hiukkaset eristetään sähköisesti toisistaan erilaisilla eristeillä, kuten kuvassa 5.

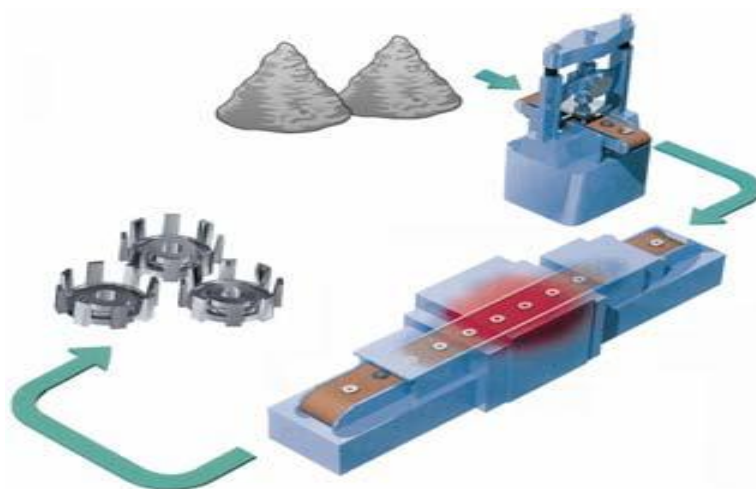


Kuva 5. havainnollistaa rautajauheen hiukkasten eristystä. [6]

Pehmeämagneettiset komposiittimateriaalit mahdollistavat jauhemetallurgia -tekniikan kanssa monia hyötyjä tavanomaisiin laminoituihin piiteräs rakenteisiin verrattuna, joita yleensä käytetään sähkömagneettisissa laitteissa. Eristetyt jauhehiukkaset mahdollistavat isotrooppiset magneettiset ominaisuudet, jotka avaavat aivan uudentyyliä suunnittelu mahdollisuuksia. Magneettiset osat voidaan suunnitella kolmiulotteisilla (3D) vuoreiteillä ja täysin erilaisilla topologeja voidaan tutkia tuottamaan korkean suorituskyvyn omaavia moottoreita, ilman laminoidun tekniikan asettamia magneettisia rajoitteita. Siksi SMC -materiaalit ovat erittäin sopivia varta vasten hammasnapa- ja poikittaisvuomoottoreille, joissa on 3D magneettivuot. Kolmiulotteisissa vuokoneissa magneettisydäimestä lähtee magneettikenttä kaikkiin kolmeen suuntaan. Tämä on mahdollista toteuttaa vain käyttämällä SMC -materiaaleja. Koska rautahiukkaset on eristetty pintapäälysteellä ja sidosaineella jota on käytetty komposiitin sitomisessa, pyörrevirtahäviöt ovat paljon matalammat kuin laminoidulla teräksellä erityisesti korkeilla taajuuksilla. Kokonaishäviöitä hallitsevat hystereesihäviöt, jotka ovat korkeampia kuin laminoidulla teräksellä. Tämä ominaisuus

mahdollistaa sen, että SMC -moottorit toimivat paremmin korkeilla taajuuksilla, jonka seurauksena voidaan vähentää myös koneen kokoa ja painoa, kuten kuvassa 4 havainnollistettiin.

SMC -materiaalien käyttö mahdollistaa massatuotannon ja alentaa moottorien valmistuskustannuksia, koska rautaytimet ja osat voidaan valmistaa suoraan haluttuun muotoon ja mittasuhteisiin. Näin ollen edelleen koneistamista vähennetään ja siksi tuotantokustannukset voivat olla paljon pienemmät kuin rei'ittämällä, pinoamalla ja hitsaamalla sähköisiä teräksiä. Kuvassa 6 on kuvattu jauhemetallurgista valmistusprosessia.



Kuva 6. Jauhemetallurginen valmistusprosessi. [6]

Toisin kuin laminoidut teräkset, SMC -osat voidaan tehdä ilman teräviä kulmia varsinkin kriittisillä alueilla. Tämä mahdollistaa ohuemman eristyksen ja paremman tilan käytön käämien kääntepisteiden ympärille. Ohuemman eristyksen ansiosta myös moottorin lämmönjohtavuus paranee.

Yksi tärkeimmistä eduista SMC -materiaaleista valmistetuilla osilla on kustannustehokkuus ja ympäristöystävällinen valmistus. Jauhemetallurginen valmistustekniikka mahdollistaa minimaalisen materiaalienekin ja on jopa 50 % kustannustehokkaampaa kuin tavanomaiset valmistusmenetelmät. SMC -materiaaleilla on myös erittäin hyvä kierrätettävyys, kuten kuvassa 7 on havainnollistettu, jossa kuparikäämit ja SMC ydin on helposti erotettavissa toisistaan.



Kuva 7. SMC moottorin kierrätettävyys. [9]

Ainutlaatuisten ominaisuuksien ohella SMC -materiaaleilla on joitakin huomattavia haittapuolia, jotka tulisi huolellisesti ottaa huomioon. SMC -materiaaleilla on esimerkiksi matalamagneettinen permeabiliteetti ja matala vuotiheyden saturaatio verrattuna laminoituihin teräksiin. Sähköisten levyjen suora korvaaminen SMC -osilla tuottaa huomomman konetehokkuuden. Tämän takia on tärkeää välttää haittoja kun käytetään hyötypuolia hyödyksi erilaisissa valmistusvaiheissa kuten suunnittelussa, valmistuksessa ja käyttösovelluksissa. Esimerkiksi SMC -materiaalit sopivat rakenteeltaan kestoplaneettimoottoreihin, joissa magneetin magneettinen reluktanssi hallitsee magneettista piiriä tekemällä moottorin ytimen permeabiliteetin tunnottomaksi. [5,8]

2.2 Materiaalien valitseminen

Oikean metallijauheen valinta on erilainen AC ja DC magneeteilla ja ne pitää käsitellä erikseen. Yleisesti on tiedossa, että jauheen magneettiset ominaisuudet ovat riippuvaisia jauheen kemiallisesta rakenteesta, sulatustavasta, kovetusprosessista ja lämpökäsittelystä. Magneettisesti pehmeisiin seoksiin täytyy sekoittaa mahdollisimman monta seuraavaa ominaisuutta kohtuullisin kustannuksin:

- matalat hystereesihäviöt
- matalat pyörrevirtahäviöt
- korkea permeabiliteetti matalilla kenttävoimakkuuksilla
- korkea saturaatioarvo
- ei ikääntymisvaikutuksia
- yhdenmukaiset magneettiset ominaisuudet

Pehmeämagneettiset jauheet tai rautapohjaiset seokset ovat yksi osatekijä SMC - materiaaleissa, jotka ovat parhaillaan korvaamassa sähköiset teräslevyt ja ferriitit joissakin sovelluksissa. Puhdas rauta on yleisin prototyyppi pehmeämagneettisissa aineissa. Sillä on erittäin korkea vuontiheyden saturaatio, ja sen kuutio-anisotropia jättää siihen suhteellisen pienen magneetikristallisen anisotropian, — ja pienen magneettikovuuden ,

. Ehtoja raudalle ei aseta ainoastaan huomattavan puhdas rauta, vaan myös hyvin tunnetut seokset joita käytetään samanlaisiin tarkoituksiin. Rautaseokset sisältävät aina 20 % asti kokonaispainosta yhtä tai useampaa alkuainetta kuten alumiinia, sinkkiä, kromia, niobiumia, molybdeenia, nikkeliä ja kobolttia. Rautaseokset tarjoavat korkeamman magneettisen permeabiliteetin ja matalammat kokonais- ydin häviöt, jonka seurauksena laitteissa on korkeampi tehokkuus kuin laitteissa jotka käyttävät puhtaita rautaytimiä. Alkuaineiden lisäys rautaan kasvattaa resistiivisyyttä, mutta pyörrehäviöt ovat silti liian korkeat, jopa 50 Hz.

Hiiliepäpuhtaudet ja kuormitus voivat olla iso tekijä hystereesihäviöissä. Useimmat teräkset joita käytetään kerrosrakenteissa omaavat matalan hiilipitoisuuden ja usein myös 1-3 % painosta piitä. Tarjotakseen optimaalisen magneettisen suorituskyvyn nämä seokset omaavat erittäin matalan tason piitä, typpeä ja happea. Ne luottavat erilaisiin alkuaineisiin kuten fosforiin, nikkeliin, piihin tai kobolttiin tehostamaan permeabiliteettia, koersitiivivoimaa tai induktiota. [5]

2.2.1 Puhdas rauta

Puhdas rauta tai sähköiset raudat ovat matalahiiliseoksia, jotka tarjoavat hieman enemmän magneettista permeabiliteettia kuin rauta-koboltti seokset. Sovelluksissa, joissa käytetään puhdasta rautajauhetta, on raudan sisältö yli 99,9 %. Alla olevassa taulukossa 1 on taulukoitu jauhemetallurgiassa käytettävässä sintraushehkus valmistusmenetelmässä käytetyn puhtaan rautajauheen magneettisia ominaisuuksia. [5]

Taulukko 1. Sintratun rautajauheen tyypillisiä magneettisia ominaisuuksia. [10]

Materiaali	Sintraus lämpötila (°C)	Tiivistys paine (MPa)	Sintraus tiheys	Magneetti- kentän voi- makkuus H_c (kA/m)	Vuontihe- ys $B @ 119$ A/m (T)	B_{max} (T)	Permeabi- liteetti μ_{max}
Puhdas rau- tajuhe	1120	410	6,82	0,23	0,73	1,06	2530
		550	7,14	0,23	0,85	1,21	3070
		690	7,30	0,23	0,92	1,29	3340
	1260	410	6,86	0,21	0,75	1,10	2730
		550	7,14	0,21	0,86	1,24	3190
		690	7,32	0,21	0,93	1,32	3570

2.2.2 Rauta-nikkeli seokset

Rauta-nikkeli seokset omaavat toistaiseksi korkeimman permeabiliteetin kaikista pehmeämagneettisista seoksista. Rauta-nikkeli seokset tarjoavat pienimmän määrän vuontiheyttä. Tämän takia nämä seokset on otettava ensimmäisenä huomioon sovelluksissa, jotka vaativat korkean permeabiliteetin ja matalan vuontiheyden. Ominaisuudet vaihtelevat komposiittivalikoimassa. Optimaalisin komposiitti pitää valita erityisiin sovelluksiin. Seoksilla jotka omaavat korkean nikkelpitoisuuden on korkea permeabilititeetti, 50 % kokonaispainostaan nikkeliä sisältävillä seoksilla on korkea magneettinen saturaatio ja seokset, jotka omaavat matalan nikkelpitoisuuden, on korkea sähköinen resistiivisyys.

Magneettisia rauta-nikkeli seoksia on yleisesti kutsuttu kestoseoksiksi. Alun perin kestoseos oli rekisteröity tuotemerkki tietylle rauta-nikkeli seokselle, mutta nyt se on yleisesti käytössä oleva termi. Teknillisesti merkittävintä kiinnostavaa rauta-nikkeli yhdistelmää on olemassa kolmea eri tyyppiä:

1. 78 % nikkeli kestoseos - korkein varhainen permeabilititeetti.
2. 65 % nikkeli kestoseos - vahva kenttä vasteen lämpökäsittelylle
3. 50 % nikkeli kestoseos - korkea vuontiheys (). [5,11]

2.2.3 Rauta-pii seokset

Rauta-pii seoksilla kaikki arvot sekä sähköinen resistiivisyys ovat korkeammat kuin raudoilla. Niistä on löydetty sopivia vaihtoehtoja magneettikenttä sovelluksiin. Nämä seokset sopivat erityisesti sovelluksiin, jotka vaativat erityisen alhaiset hystereesihäviöt, korkean permeabiliteetin, matalan jäännösmagnetismin ja ovat vapaita magneettisesta ikääntymisestä.

6,5 % kokonaispainosta sisältävä rauta-pii seos on erittäin tunnettu seos, koska sillä on erinomaiset pehmeämagneettiset ominaisuudet kuten korkea magneettinen saturaatio, lähellä nollaa oleva magneettinen kovuus ja korkea resistiivisyys, joka viittaa siihen että ydinhäviöitä pitäisi vähentää suhteessa verrattuna 3 – 4 % kokonaispainosta omaaviin piiseoksiin. Piin lisääminen kasvattaa raudan resistiivisyyttä ja vähentää tehohäviöitä mutta samalla piin määrän kasvattaminen haurastuttaa ja koven-taa materiaalia. [5,11]

2.2.4 Rauta-koboltti seokset

Rauta-koboltti seoksilla on korkein magneettinen saturaatio kaikista magneettiseok-sista. Seoksen magneettinen saturaatio voi olla 2,4 T ja magneettikentän voimakkuus luokkaa 0,16 – 0,40 kA/m. Rauta-koboltti seokset, hieman parantuneella permeabili-teetilla ovat yleisesti suosittuja niiden korkean vuontiheyden vuoksi. Tämä ominai-suus maksimoi magneettipiiristä saatavan magnetismin. Tämän ryhmän seoksia on käytetty useimmiten avaruusmoottoreissa, laminoiduissa generaattoreissa, sähkö-magneeteissa, korkean suorituskyvyn muuntajissa ja magneettisissa laakereissa. [5,11]

Taulukko 2. Kestomagneettimateriaalien tyypillisiä ominaisuuksia. [10]

Seos	Tyypillinen tiheys (g/cm ³)	Permeabili- titeetti μ_{\max}	Magneettiken- tän voimakkuus H_c (kA/m)	Vuontihe- ys B_{\max} (T)	Resistiivi- syys ($\mu\Omega\text{-cm}$)
Fe	6,8/7,2	1800/3500	0,12 – 0,2	1,0/1,3	10
Fe-P	6,7/7,4	2500/6000	0,10 – 0,16	1,0/1,4	30
Fe-Si	6,8	2000/5000	0,02 – 0,08	0,8/1,1	60
400SS (ruostuma- ton teräs)	5,9/6,5	500/1000	0,12 – 0,24	0,6/0,8	50
50Ni/50Fe	7,2/7,6	5000/15000	0,01 – 0,04	0,9/1,4	45

2.3 Eristetyt rautapohjaiset jauheet

SMC -materiaalit ovat periaatteessa puhtaita rautajauhehiukkasia, jotka on päällystetty erittäin ohuella, sähköisesti eristävällä kerroksella. Hyvä eristys ja hienot hiukkas-
et takaavat minimaaliset pyörrevirrat etenkin korkeilla taajuuksilla. Matalilla taa-
juuksilla eristys on vähemmän kriittinen, mutta kuitenkin tarpeellinen minimoimaan
pyörrevirtojen negatiivisia vaikutuksia materiaalin magnetismiin. Eristysteknologias-
sa käytetään kahta päätekniikkaa:

1. nestemäinen päällystystekniikka, jota on käytetty yli kaksi vuosisataa teolli-
suudessa
2. jauhepäällystystekniikka, jota on käytetty teollisuudessa noin 30 vuotta

Yleisesti eristävät päällysteet on luokiteltu kahteen pääkategoriaan: epäorgaanisiin ja
orgaanisiin päällysteisiin. Epäorgaaniset päällysteet voidaan jakaa useisiin kategori-
oihin; metallioksidipäällysteisiin (kuten Fe₃O₄), fosfaattipäällysteisiin (sinkki fosfaat-
ti, rauta fosfaatti ja magnesium fosfaatti) ja sulfaattipäällysteisiin. Orgaaniset päällys-
teet voidaan jakaa kahteen kategoriaan; kestumuovipäällysteisiin ja kertamuovipääl-
lysteisiin. [5]

2.3.1 Orgaaniset päällysteet

Saavuttaakseen maksimaalisen magneettisen permeabiliteetin päällystettyjen hiukkasten määrä eristyksessä tulisi minimoida ja raudan tilavuus maksimoida. Polymeerisidotuista hiukkasista tehdyillä ytimillä pitäisi olla mahdollisimman matala polymeerisisältö. Matalalla polymeerisisällöllä on kuitenkin tapana heikentää ytimien fyysistä kestävyyttä. Yhteenvedo tyypillisistä magneettisista ominaisuuksista jotka vaihtelevat eristettyjen hiukkasmateriaalien mukaan on annettu taulukossa 3.

Taulukko 3. Tyypillisiä mekaanisia ja magneettisia ominaisuuksia eristetyille hiukkasmateriaaleille. [12]

Materiaali	Polymeerieristys	Oksidieristys	Valmistus lämpötila (jauheelle/muotille) (°C)	Kovettumislämpötila (°C)	Tiheys 690 Mpa paineessa (g/cm ³)	Lujuus (MPa)	Permeabiliteetti μ_i	Permeabiliteetti μ_{max}	Magneettikentän voimakkuus H_c	Vuontiheys B(T)
SC100	0,75	Ei	150/260	315	7,20	210	100	400	388	1,09
SC120	0,60	Ei	150/260	315	7,30	210	120	425	380	1,12
SC600	0,25	Ei	150/260	315	7,40	100	140	600	380	1,27
TC80	0,75	Kyllä	150/260	315	7,15	210	80	210	380	0,77
AP500 LS	-	Kyllä	Kylmä	480	7,22	35	85	425	243	1,27
AP500 HS Cured	-	Kyllä	Kylmä	150	7,15	95	80	230	380	0,86
AP500 HS Warm Press	-	Kyllä	Kylmä/150	-	7,45	90	90	300	388	0,99
AP500 High Perm	-	Kyllä	Kylmä/150	480	7,20	35	80	520	307	1,29
LCM	-	Kyllä	Kylmä/260	650	7,25	25	125	245	356	0,80

Magneettiset rautaydinhiukkaset voidaan päällystää polymeereillä monilla eri tavoilla, kuten:

- hajottamalla hiukkaset liuottimeen liuenneiden polymeerien kanssa liuokseen, jonka jälkeen liuotin poistetaan
- polymeroida polymeerit asettumaan hiukkasten pinnalle
- päällystää hiukkaset nestemäisellä pedillä sopivan liuottimen ja liuenneiden polymeerien kanssa

Useimmiten polymeereillä joiden odottaisi selviävän vihamielisessä ympäristössä, ei ole prosessissa vaadittavia ominaisuuksia joita vaaditaan päällystämään hiukkaset täydellisesti, muovaamaan korkean tiheyden sekä korkean kestävyuden ytimille halutuilla fyysisillä ja magneettisilla ominaisuuksilla. Polymeerit jotka muuten sopivat vihamieliseen ympäristöön ovat kuitenkin kertakäyttöisiä. Sen jälkeen kun polymeerit on kerran kiinnitetty rautahiukkaseen, ei niitä voida enää liuottaa, uudelleen käyttää tai tiivistää. Toisaalta useimmilla kestopolymeereillä, jotka ovat sekä muovattavia että kyvykkäitä vastustamaan vihamielistä ympäristöä, ei voida päällystää pieniä rautahiukkasia tasaisesti ja yhtenäisesti. Tämä johtuu siitä että ne ovat pohjimmiltaan esimerkiksi liukenemattomia teollisuudelle otollisiin liuoksiin (esim. kristallisiin kes- tomuoveihin), eivätkä päällystä hiukkasia hyvin. Niitä ei voida käsitellä kuumentuvissa olosuhteissa valmistettaessa valua ja niillä on liian korkea sulamisviskositeetti kunnolliseksi täytteeksi valun valmistuksessa.

Valittaessa kertakäyttöisiä polymeerejä kestopolymeerien sijasta on minimoitava lämpötilan muutosten vaikutukset komposiittien magneettisille ja mekaanisille ominaisuuksille. Kertakäyttöiset jauhepäällysteet tarjoavat monia hyötyjä, jotka houkuttelevat pinnoiteteollisuuden yrityksiä käyttämään niitä:

- jauhe on heti valmis käyttöön
- prosessin aikana menee vähemmän jauhetta hukkaan
- vähentää terveysuhkia, joille koneenkäyttäjä altistuu
- paremmat sidoskalvo-ominaisuudet
- matalammat kustannukset

Osa käytössä olevista kertakäyttöpäällysteistä on listattu taulukkoon 4. [5]

Taulukko 4. Käytössä olevia kertakäyttöisiä päällysteitä. [5]

Nimi	Kuvaus
Epoksijauheet	Korkeakiiltoinen ja sileä eriste erinomaisella tartunnalla, joustavuudella ja kovuudella, liuotin ja kemiallinen vastustuskyky
Akryylijauheet	Laajasti käytössä oleva pintaeriste, hyvällä kiillolla ja värin pitävyydellä ulkopuolisille altistumisille, lämpö ja alkali vastustuskyky
Polyesterijauheet	Yleinen suorituskky epoksi- ja akryylijauheiden väliltä, erinomainen kestävyys, korkea vastustuskyky ultra-violetti valon aiheuttamalle jälkikellertymälle
Epoksi-polyesteri-hybridijauheet	Prosentuaalisesti korkea epoksiptoinen jauhe erityisellä polyesterihartsilla (joskus yli 50 %), vastustuskyky ylikuumenemisesta aiheutuvalle kellertymiselle sekä säänkestävä, tärkeä kulmakivi jauhe-eristysteollisuudelle
Polyuretaani-jauheet	Yleisesti hyvät fyysiset ja kemialliset ominaisuudet, hyvä ulkoinen kestävyys

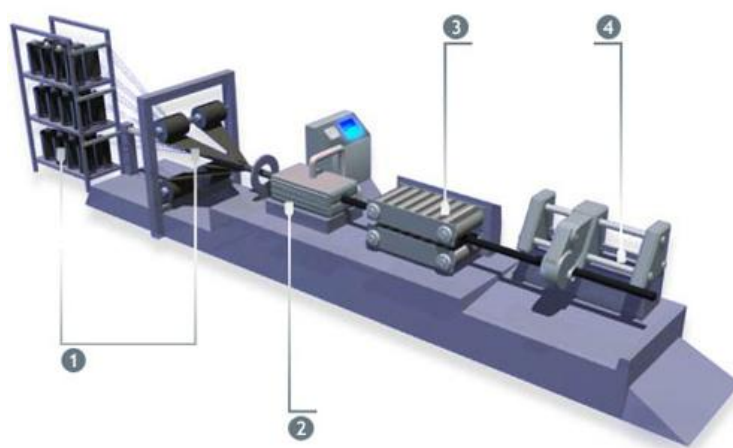
2.3.2 Epäorgaaniset päällysteet

Epäorgaanisiin päällysteisiin kuuluu useita epäorgaanisia yhdisteitä, kuten fosfaatteja (sinkki-, rauta-, magnesiumfosfaatit), oksideja ja sulfaatteja. Näitä voidaan käyttää luomaan sähköisesti eristettyjä hiukkasia. Yleisesti on kaksi tapaa käyttää epäorgaanisia päällysteitä rautapohjaisissa hiukkasissa: märkäkemiallinen ja kuivakemiallinen. Märkäkemiallisessa menetelmässä sopiva epäorgaaninen kerros, kuten rautatai sinkkifosfaatti, saostutetaan metallin pinnalle. Kuivassa prosessissa metallijauheet on esimerkiksi hapetettu uunissa sopivassa lämpötilassa ja olosuhteissa. Märkäkemiallisessa prosessissa on vaikeampaa verrata jauhetta materiaalin tilavuuteen ja prosessi tarvitsee kontrolloidun ajan, lämpötilan sekä kylpykoostumuksen. Esimerkiksi fosfointiaika jauheelle on paljon lyhyempi kuin valtaosalle materiaalia. Kolme pääasiallista fosfaattipäällystä joita yleisesti käytetään perustuvat sinkkiin, rautaan ja magnesiumiin. Näitä päällysteitä voidaan käyttää suihkuttamalla tai upottamalla sekä mekaanisissa sidoksissa. [5]

2.4 Pultruusio

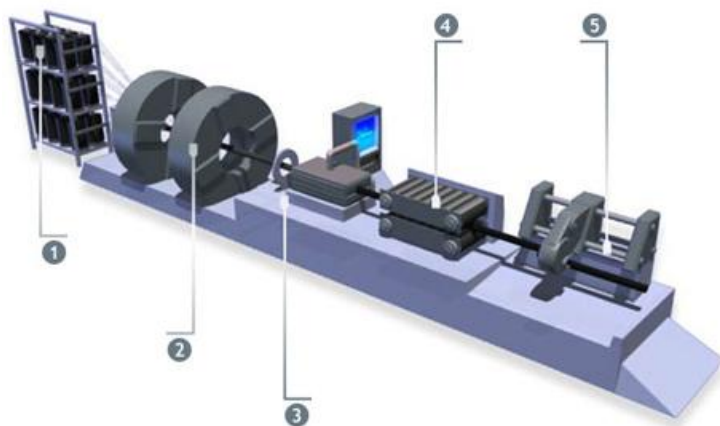
Pultruusio eli suulakeveto on valmistustekniikka, jolla voidaan valmistaa yhtämittaisia profiileja komposiittimateriaaleista. Pultruusiotekniikka mahdollistaa massatuotannon erittäin kustannustehokkaasti ja sillä voidaan valmistaa pieniä tai isoja sekä etenkin pitkiä profiileja.

Pultruusiotekniikka perustuu erilaisiin vahvikekuituihin ja hartsiseoksiin. Yleisimmät pultruusiomenetelmässä käytettävät kuidut ovat aramid-, lasi- ja hiilikuidut. Taulukkoon 5 on koottu tekniikassa tyypillisesti käytettyjen kuitujen ominaisuuksia. Kuidut vedetään yksittäin, mattona tai erilaisina yhdistelminä tietyn hartsiseoksen läpi. Hartsiseoksessa käytetään tavanomaisesti polyesteriä tai vinyyliesteriä. Hartsi on tärkeä tekijä pultruusiomenetelmässä. Prosessissa käytettävä hartsi määrittelee minkälaiset ovat valmistettavan tuotteen mekaaniset ominaisuudet, sähköinen eristys, korroosionkestävyys, käyttölämpötila sekä palo-ominaisuudet. Taulukkoon 6 on koottu pultruusiotekniikassa käytettyjen hartsien tyypillisiä ominaisuuksia. Kuidut kyllästetään hartsiin, jonka jälkeen ne vedetään kuumennetun muotin läpi ja muovataan. Muovauksen jälkeen kuidut ja hartsi kovettuvat ja tuloksena saadaan halutun muotoista profiilia. Valmiit profiilit voidaan tuotantolinjan lopussa vielä sahata halutun mittaisiksi. Kuvassa 8 on havainnollistettu pultruusioprosessin tuotantolinjaa ja valmistusprosessin eri vaiheita. [13,14]



Kuva 8. Pultruusioprosessin tuotantolinja. 1. Kuitu ja kyllästys yksikkö 2. Muovausyksikkö 3. Veto-yksikkö 4. Sahausyksikkö. [13]

Pultruusiotekniikkaa voidaan soveltaa ja sitä käytetäänkin hyväksi mm. Pull-winding –teknologiassa. Jossa pitkittäissuuntaiseen pultruusioprosessiin lisätään poikittaissuuntaisia kuituja erilaisten kelojen avulla. Kuvassa 9 on havainnollistettu Pull-winding -prosessia, joka ei eroa muuten pultruusiomenetelmästä kuin poikittaissuuntaisia kuituja syöttävistä keloista. Pull-winding mahdollistaa ohutseinäisempien profiilien valmistuksen verrattuna tavanomaiseen pultruusiotekniikkaan. [13]



Kuva 9. Pull-winding –prosessi. [13]

Pultruusiotekniikalla valmistettuja tuotteita käytetään hyväksi monilla eri teollisuudenaloilla kuten kuljetusvälineiteollisuudessa, rakentamisessa rakenteina ja esimerkiksi silloissa, paperiteollisuudessa, telekommunikaatiossa sekä urheilu- ja vapaa-aikateollisuudessa. Energiateollisuudessa pultruusiomenetelmää käytetään hyväksi etenkin tuulivoimaloiden profiilien valmistuksessa. Sähköteollisuuteen pultruusiomenetelmällä valmistetut profiilit sopivat erityisesti niiden sähköeristävyyden kannalta. Niitä käytetään eristeprofiileina mm. muuntajissa, metrojen virtakiskojen suo- jissa, erilaisissa kaapelihyllyissä ja tikapuissa sekä sähköputkissa. [13,14]

Taulukko 5. Pultruusioprosessissa käytettävien kuitujen tyypillisiä ominaisuuksia. [14]

Materiaali	Tiheys (Kg/m ³)	Vetolujuus (MPa)	Vetokerroin (GPa)	Murtovenymä (%)
E-glass	2600	3447,5	72,4	4,8
S-glass	2491	4585,2	86,9	5,4
Kevlar (Aramid)	1470	2964,9	131,0	2,3
Spectra	968	1170,0	26,0	3,7
Carbon (T300)	1720	1896,1	379,2	0,5
Carbon (Inter. modu- lus)	1770	2560,9	473,6	1,81

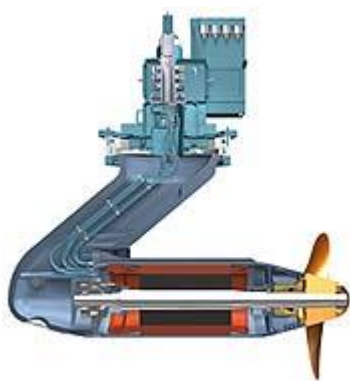
Taulukko 6. Pultruusioprosessissa käytettävien hartsien tyypillisiä ominaisuuksia. [14]

Materiaali	Tiheys (Kg/m ³)	Vetolujuus (MPa)	Vetokerroin (GPa)	Murtovenymä (%)	Taivutuslujuus (MPa)	Taivutuserroin (GPa)	Vääristymis- lämpö (°C)
Polyesteri	1100	77,2	3,3	4,2	122	3,2	77
Vinyylisteri	1100	81,2	3,4	4,5	134	3,1	99
Epoksi	1300	75,4	3,3	6,3	115	3,3	166

2.5 Sovellukset

Pehmeämagneettiset komposiittimateriaalit ovat mahdollistaneet kokonaan uusien sovelluksien kehittämisen sekä mahdollisuuden parantaa jo olemassa olevien sovelluksien ominaisuuksia paremmiksi. Uusia sovelluksia on käytössä jo laajalti teollisuuden eri osa-alueilla. Esimerkiksi laivateollisuus käyttää jo uusia kääntyviä sähköisiä moottoreita, jotka voidaan asentaa suoraan laivan pohjaan parantamaan laivan

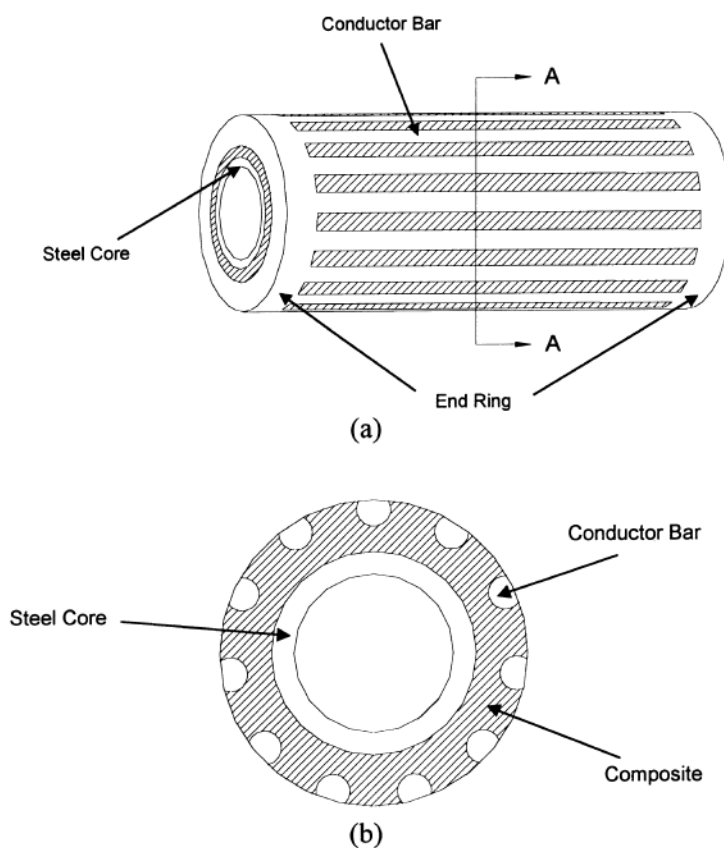
ohjattavuutta ja tehokkuutta jopa 15 %. Kuvassa 10 on ABB: n kehittämä Azipod-ruoripotkuri. Autoteollisuus käyttää uusia nykyaikaisia kestmagneettisovelluksia hybridautoissa. Kestomagneettimoottoreiden sovelluksia käytetään pitkälti myös paperikoneissa, hisseissä, lentoteollisuudessa, uusissa junissa sekä tuuliturbiineissa. [15]



Kuva 10. ABB: n Compact Azipod-moottori. [16]

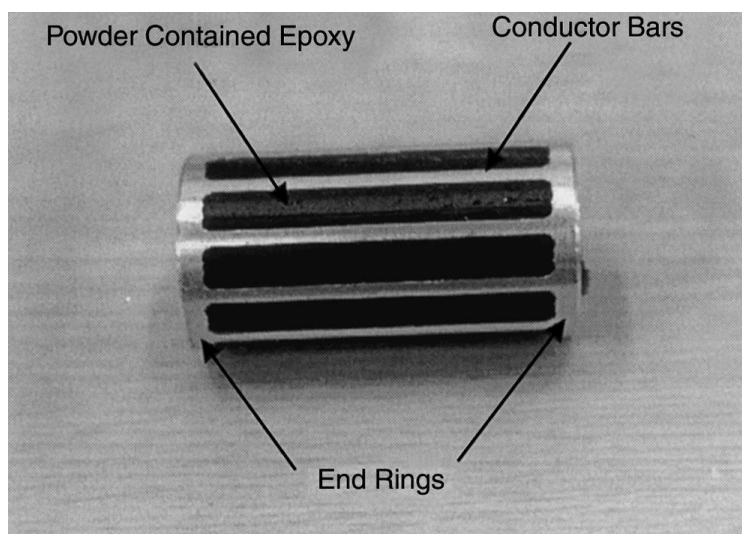
Uudenlaiset komposiittimateriaalit ovat mahdollistaneet etenkin uusia sovelluksia tavanomaisiin sähkömoottoreihin ja parantaneet näin ollen huomattavasti niiden tehokkuutta. Etenkin 3D-suunnittelu ja uudenlaiset rakennemenetelmät ovat avainasemassa uudenlaisten moottorien kehityksessä.

Kestomagneettimoottorin roottori voidaan valmistaa kokonaan käyttäen vain komposiittimateriaaleja. Samankaltaista ratkaisua voidaan käyttää myös korkeanopeusinduktiomoottoriin. Kuvassa 11 on havainnollistettu kyseisen roottorin rakennetta. Häkkikäämitys on rakennettu alumiinista, jonka sisällä on teräsydin. Roottori valettiin vielä yhtenäiseksi kokonaisuudeksi asettamalla se muottiin ja kaatamalla sinne rautajauhetta sisältävää epoksikomposiittia. [17]



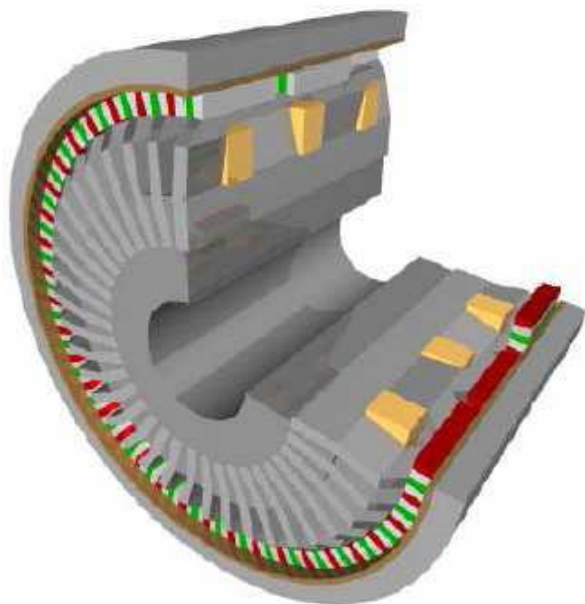
Kuva 11. Induktiomootorin komposiittiroottorin rakenne. [17]

Tuloksena saatiin 41 % kevyempi roottori verrattuna tavanomaiseen piiteräsroottoriin. Tuloksista huomattiin että komposiittiroottorilla oli muitakin hyötyjä, kuten massan vähennyksestä johtuva pienempi tehon kulutus ja moottorin matalampi jätätämä. Kuvassa 12 on vielä valokuva valmiista komposiittiroottorista. [17]



Kuva 12. Valokuva komposiittiroottorista. [17]

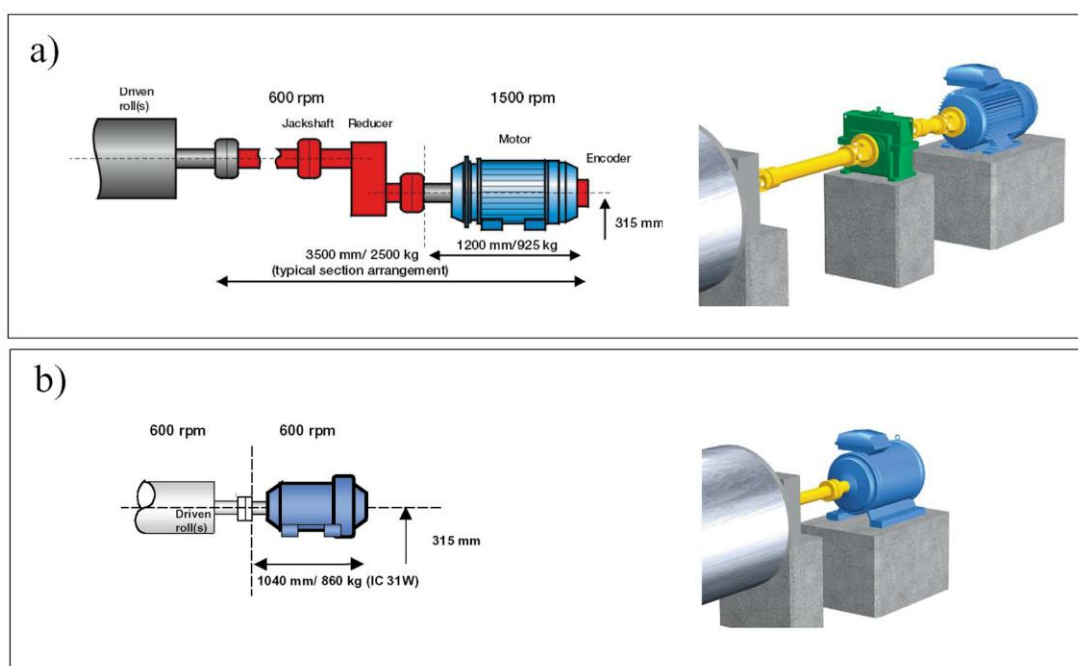
Pehmeämagneettisista komposiittimateriaaleista valmistettuja sovelluksia voidaan käyttää hyödyksi myös kestmagneettisissa poikittaisvuomootoreissa. Erityisesti pehmeämagneettisten komposiittimateriaalien mahdollistama kolmiulotteinen magneettikenttien toteutus on toimiva rakenneratkaisu hammasnapa- ja poikittaisvuomootoreille, jotka käyttävät kolmiulotteisia magneettivuota. Kolmiulotteisissa magneettivuokoneissa ankkuri kuljettaa magneettikenttiä kaikkiin kolmeen suuntaan tavanomaisen moottorin rakenteen sijasta, jossa vuo kulkee pääosin pitkittäissuuntaisesti. Tätä kolmiulotteista magneettikenttärakennetta on erittäin vaikea toteuttaa tavanomaisilla teräsrakenteilla, jonka taas komposiittimateriaalien tarjoamat ainutlaatuiset ominaisuudet mahdollistavat. Kuvassa 13 on havainnollistettu poikittaisvuomootorin rakennetta, joka on kehitetty teknisessä yliopistossa Aachen:ssa, Saksassa. Ulkoinen roottori koostuu kestmagneeteista ja vuo keskittyy rautaosiin, jotka on tehty pehmeämagneettisista komposiiteista. Sisemmän staattorin kaksi osaa on taivutettu niin, että ne ovat siirtyneet sähköisesti toisiinsa nähden 180 astetta. Tämä on tärkeää moottorin toiminnan kannalta. [8]



Kuva 13. Aachen: ssa kehitellystä poikittaisvuomootorin rakenteesta. [18]

Poikittaisvuokoneet mahdollistavat korkean vääntömomentin pienillä pyörimisnopeuksilla ja toimivat etenkin niin sanotulla ”Direct Drive” suora-ajo toiminnolla. Direct Drive toiminto mahdollistaa sähkömoottorin tarkemman ajon ilman akselien ja vaihteleväysten aiheuttamia resonanssi-ilmiöitä. Toiminnon etuihin kuuluu myös kustan-

nusten vähentyminen suunnittelu-, asennus- ja ylläpitokustannusten osalta vähentyneiden komponenttimäärien takia. Esimerkiksi Direct Drive mahdollistaa, että sähkömoottorin vaihteisto voidaan poistaa kokonaan. Energiakustannuksissa säästetään myös vähentyneiden kokonaishäviöiden ansiosta. Kuvassa 14a on kuvattu tavanomaisen sähkömoottorin ajoa vaihteiston ja akselin avulla, kun taas kuvassa 14b on kuvattu uudenlaisen sähkömoottorin mahdollistamaa Direct Drive käyttöä. Kuvasta 14 huomataan kuinka uudenlaisen sähkömoottorin mahdollistama Direct Drive käyttö yksinkertaistaa koneen asennusta ja vähentää merkittävästi koneen vaatimaan asennustilaa sekä painoa. [8,19]



Kuva 14. Kuvassa a) tavanomaisen sähkömoottorin käyttö vaihteiston ja akselien avulla, b) kesto-
magneettimoottorin mahdollistama Direct Drive käyttö. [19]

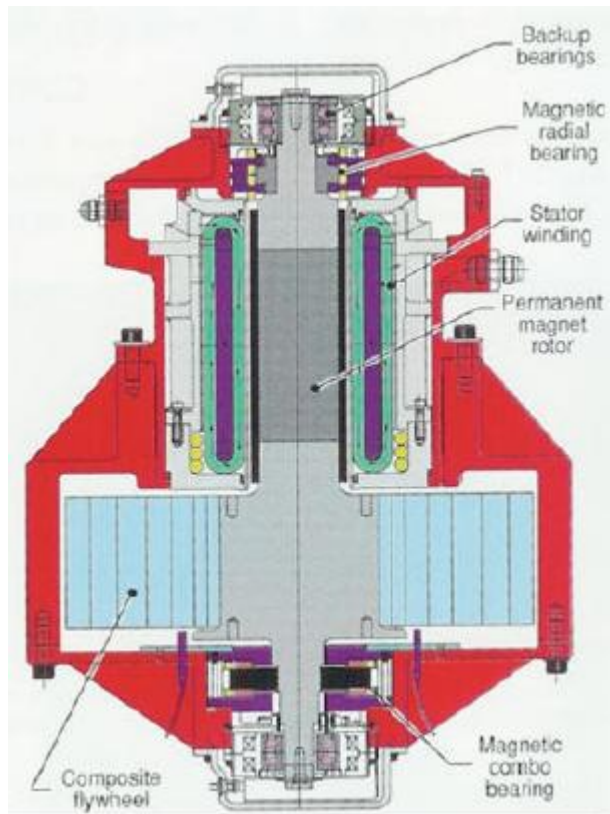
3 PULTRUUSIOTEKNIKKALLA VALMISTETTUIJEN TUOTTEIDEN SOVELTUVUUS MARKKINOILLA KÄYTETTÄVIIN MENETELMIIN

Pultruusiotekniikkaa voidaan käyttää hyödyksi sähkömoottorien tuotekehityksessä eritoten valmistettaessa erilaisia eristysratkaisuja sähkömoottoreihin. Pultruusiotekniikalla valmistettuja tuotteita käytetäänkin jo laajalti sähkömoottoreissa ja niiden eristysrakenteissa. Pultruusiotekniikka mahdollistaa erilaisia eristeratkaisuja etenkin sähkömoottorien staattorin uraeristykseen. Pultruusiotekniikalla voidaan valmistaa esimerkiksi moottorin staattoriuraan kiiloja, jotka pitävät vyyhdit paikallaan.

Kestomagneettimoottorien kehittyminen ja niiden mahdollistamat uudet sovellukset ovat kasvattaneet mielenkiintoa niihin. Kasvava mielenkiinto kestomagneettimoottoreihin kasvattaa myös kysyntää erilaisiin putkimaisiin tuki- ja eristysratkaisuihin. Pultruusiotekniikka mahdollistaakin erityisen hyvin juuri erilaisten tuki- ja eristysrenkaiden massatuotannon. Kestomagneettimoottorien kysynnän lisääntymisen myötä myös kasvavaa markkina-aluetta erilaisille renkaille, tukirenkaille, tukiholkeille ja –laakereille näyttäisi löytyvän.

Tulevaisuuden innovaatioita, joita pultruusiotekniikka voisi mahdollistaa käytettäväksi sähkömoottoreissa, voisivat olla muun muassa erilaiset komposiitista valmistettavat akselit ja vauhtipyörät. Komposiiteista valmistetaankin erilaisia akseleita jo etenkin autoteollisuuden käyttöön. Tulevaisuudessa pultruusiotekniikka voisikin mahdollistaa erilaisten akselien valmistuksen, joita voitaisiin käyttää myös sähkömoottoreissa.

Kestomagneettimoottorien tehokkuuden parantamiseksi niissä on alettu käyttää vauhtipyöriä. Vauhtipyörä varastoi moottorin energiaa pyörimisliikkeen muodossa ja toimii eräänlaisena patterina etenkin kestomagneettimoottoreissa. Vauhtipyöriä on alettu valmistaa käyttämällä komposiittimateriaaleja ja pultruusiotekniikka voisi olla yksi keino niiden valmistamiseen kustannustehokkaammin. Kuvassa 15 on kuvattu kestomagneettimoottoria, joka on kehitelty Texasin yliopistossa ja jossa on komposiitista valmistettu vauhtipyörä. [20]



Kuva 15. Texasin yliopistossa kehitetty kestopagneettimoottori jossa on komposiitista tehty vauhti-pyörä. [20]

4 YHTEENVETO

Mielenkiinto komposiittimateriaaleja kohtaan on mahdollistanut niiden jatkuvan kehityksen sekä niistä valmistettavien erilaisten sovellusten kehitystyön. Uusien komposiittimateriaalien käyttö ja kehittyminen on ollut hyödyksi etenkin kestopagneettimoottorien tuotekehityksessä. Erilaiset komposiittiratkaisut ovat mahdollistaneet uusien ja parempien sovellusten tuotekehityksen sekä rakenneratkaisuja, jotka parantavat huomattavasti sähkömoottorien toimintaa ja tehokkuutta. Uusien komposiittimateriaalien myötä myös sähkömoottorien tuotantotehokkuus sekä ympäristöystävällisyys ovat parantuneet.

Pehmeäagneettisten komposiittimateriaalien yleistyminen on vaikuttanut paljon kestopagneettimoottorien tuotekehitykseen. Pehmeäagneettiset materiaalit ovat vaikuttaneet etenkin uudenlaisiin ja kehittyneisiin rakenneratkaisuihin sähkömoottoreissa. Pehmeäagneettisten komposiittien ainutlaatuiset ominaisuudet mahdollistavat aivan uudenlaisten sovellusten ja rakenteiden suunnittelun ja valmistuksen.

Pultruusiotekniikka mahdollistaa erilaisten komposiittiprofiilien massatuotannon erityisen tehokkaasti ja soveltuu etenkin eristysprofiilien valmistukseen. Etenkin kestopagneettimoottorien kysynnän lisääntyminen mahdollistaisi pultruusiotekniikalla valmistettavien komposiittiprofiilien massatuotannon, mikä alentaisi myös moottorien valmistuskustannuksia. Tulevaisuudessa pultruusiotekniikalla voitaisiin valmistaa myös mahdollisesti muita komposiittiosia etenkin kestopagneettimoottoreihin, kuten vauhtipyöriä sekä akseleita ja parantaa näin ollen niiden tehokkuutta pienemmillä valmistuskustannuksilla.

LÄHTEET

- 1 Korpinen L. SHKVOIMATEKNIKKAAOPUS, sähkökoneet. Viitattu 15.8.2011.
http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf
- 2 Paloniemi P. & Keskinen E. 1996. Sähkökoneiden eristykset, Sähkömekaniikan lisensiaattiseminaari. Otaniemi.
- 3 Sihvo V. 2006. Höyrynestävän eristerakenteen suunnittelu sähkökoneen staattoriin. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö. Viitattu 15.8.2011.
www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical.../Ville_Sihvo.pdf
- 4 Rilla M. 2006. Kestomagneettitahtikoneen lämpömallinnus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö. Viitattu 15.8.2011
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/30272/TMP.objres.353.pdf?sequence=1>
- 5 Shokrollahi H. & Janghorban K. 2007. Soft magnetic composite materials (SMCs). Shiraz University. Department of Materials Science and Engineering. Iran.
- 6 Andersson O. & Hofecker P. 2009. Advances in Soft Magnetic Composites, Materials and Applications. Las Vegas, USA. Viitattu 15.8.2011
http://www.hoganas.com/Documents/Published%20Articles/2009/PM09_09_Powdermet_Andersson_Hofecker.pdf
- 7 Pennander L. & Jack A. 2003. Soft magnetic iron powder material AC properties and their application in electrical machines, Magnetic material. Euro.
- 8 Guo Y.G. & Zhu J.G. 2004. Study of permanent magnet transverse flux motors with soft magnetic composite core. University of Technology. Sydney. Viitattu 15.8.2011

<http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec04/papers/PaperID197.pdf>

- 9 “SMC Ready, Steady, Go...”. 2003. Metalpower Report. Högnäs AB. Sweden.

- 10 Narasimhan K., Hanejko F. & Marucci M.L. 2008. Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials. Presented at the World Congress. Washington D.C. Viitattu 16.8.2011 www.hoeganaes.com

- 11 Santa-Nokki T. Pehmeämagneettiset materiaalit. Prizztech. Magneettiteknologiakeskus. Viitattu 16.8.2011
www.prizz.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=2&id=182&sid=491

- 12 Narasimhan K.S., Marucci M.L. 2003. Innovative electric devices using ironpolymer materials. Magn. Mater. Euro PM 207-212

- 13 Exel Composites: n www.sivut. Viitattu 20.9.2011
www.exelcomposites.com

- 14 Peters S.T. 1987. Pultrusion, Handbook of composites. s. 488-524. Ohio.

- 15 Virolainen P. 2005. Kestomagneettimoottori tulee suurteollisuuteen. Tekniikka & Talous, Energia 27.1.2005. Viitattu 15.8.2011
<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/kestomagneettimoottori+tulee+suurteollisuuteen/a25452>

- 16 ABB: n www.sivut. Viitattu 15.8.2011
www.abb.com

- 17 Chang S.H.^a, Lee D.G.^a & Choi J.K.^b 2000. Composite rotor for high-speed induction motors. ^aDepartment of Mechanical Engineering. Korea Advanced Institute of Science and Technology. ^bDepartment of Manufacturing Technology. Institute for Advanced Engineering. South Korea.

- 18 Henneberger G. & Bork M. 2000. Development of a Transverse Flux Traction Motor in a Direct Drive System. International Conference on Electrical Machines. Helsinki, Suomi.
- 19 Welin B. & Friman C.J. 2001. New Direct Drive system opens a new era for paper machines. ABB: n Paperi ja Puu- Paper and Timber. Vol. 83/No. 5/2001. Viitattu 15.8.2011
www05.abb.com/...nsf/.../paperi%20ja%20puu%20aug15%20hi%20res.pdf
- 20 Ashley S. Test Devices Inc. Designing Safer Flywheels, Mechanical Engineering magazine. Vol. 118/No. 11. Viitattu 19.10.2011
http://www.testdevices.com/white_papers_pdf/flywheel_art_TD1w.pdf